МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631.363.7 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-408-413

Влияние конструктивных и кинематических параметров на энергоёмкость процесса в наклонном шнековом смесителе*

В. Ф. Хлыстунов[1], С. В. Брагинец[2], А. С. Алфёров[3], М. В. Чернуцкий[4]**
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2,3,4]Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация

Effect of design and kinematic parameters on energy requirement in inclined screw mixer ***

V. F. Khlystunov[1], S.V. Braginets[2], A.S. Alferov[3], M.V. Chernutskiy[4]**
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2,3,4]Agricultural Research Centre "Donskoy", Zernograd, Rostov Region, Russian Federation

Введение. Обоснованы рациональные параметры и режимы наклонного шнекового смесителя периодического действия для достижения наименьшей энергоемкости приготовления кормосмеси при условии соблюдения зоотехнических требований к качеству приготовляемых кормов по неравномерности смешивания. Установление функциональных зависимостей между параметрами и режимами позволяет проектировать энергоэффективное оборудование для внутрихозяйственного комбикормового производства.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования процесса приготовления кормосмеси проводили на наклонном одновальном шнековом смесителе кормов периодического действия. План эксперимента включал варьирование четырьмя независимыми факторами: частотой вращения вала смесителя, коэффициентом заполнения камеры смесителя, продолжительностью смешивания и углом наклона смесительной камеры. В качестве критериев оптимизации, характеризующих эффективность смешивания, были приняты неравномерность смешивания и удельная энергоемкость процесса.

Результаты исследования. Построены графические зависимости критериев оптимизации от уровня варьирования факторов, представляющие собой двумерные сечения поверхностей отклика второго порядка. Рациональные значения при неравномерности смешивания менее 5% составили: частота вращения вала — 27,5-36,5 мин$^{-1}$, коэффициент заполнения камеры смесителя — 0,43–0,51, продолжительность смешивания — 3,0–4,2 мин.; угол наклона смесительной камеры — 22°–25°. При таких значениях параметров неоднородность смешивания будет минимальной и составит 4,10–4,18%, а энергоёмкость процесса составила от 2,08 до 2,16 кВт·ч/т

Обсуждение и заключения. Зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований, позволили установить области рациональных конструктивных параметров и режимов наклонного одновального шнекового смесителя периодического действия. Полученные результаты могут быть использованы в

Introduction. Rational parameters and modes of an inclined batch screw mixer are validated to achieve the lowest energy-intensive feed mixing under observance of the zootechnical requirements for the feed quality on uneven mixing. The establishment of functional dependences between parameters and modes enables to design power-efficient equipment for the on-farm feed production.

Materials and Methods. Experimental studies of the feed mixing were implemented on an inclined screw batch feed mixer. The experimental design included variation of four independent factors: mixer shaft speed, filling ratio of the mixing chamber, mixing time, and mixing chamber angle. Mixing irregularity and energy intensity of the process were taken as optimization criteria characterizing the mixing efficiency.

Research Results. The optimization criteria versus the variability level factor, which are two-dimensional sections of the second-order response surfaces, are plotted. The rational values at mixing irregularity of less than 5% were as follows: mixer shaft speed was 27.5-36.5 min-1, filling ratio of the mixing chamber was 0.43–0.51, mixing time was 3.0–4.2 min, mixing chamber angle was 22°–25°. At such parameter values, the mixing irregularity will be minimal, and it will be 4.10–4.18%, and the process intensity is from 2.08 to 2.16 kW • h/t

Discussion and Conclusions. The dependences obtained as a result of the experimental studies allowed establishing the domain of rational design parameters and modes of an inclined batch screw mixer. The results obtained can be used in further studies under the development of initial requirements for the

* Работа выполнена по теме № 0708-2018-0024 в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013– 2020 гг. в части НИР.
**E-mail:vniptim@gmail.com, sbraginets@mail.ru, alfa-8303@yandex.ru, m1chaelc@yandex.ru
***The research is done on theme no. 0708-2018-0024 within the frame of the Program of Fundamental Scientific Research of National Academy of Sciences for 2013– 2020 in R&D.

дальнейших исследованиях при разработке исходных требований на создание новых технических средств с гравитационным эффектом интенсивного смешивания.

creation of new technical means with a gravitation effect of intensive mixing.

Ключевые слова: проектирование, наклонный смеситель, шнек, гравитационное осыпание, неравномерность смешивания, энергоемкость смешивания.

Keywords: design engineering, inclined mixer, screw, gravitation shattering, mixing irregularity, mixing intensity.

Образец для цитирования: Хлыстунов, В. Ф. Влияние конструктивных и кинематических параметров на энергоёмкость процесса в наклонном шнековом смесителе / В. Ф. Хлыстунов [и др] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 4. — С. 408-413. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-408-413.

For citation: V.F. Khlystunov, et al. Effect of design and kinematic parameters on energy requirement in inclined screw mixer. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 408-413. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-408-413.

Введение. Актуальной задачей при проектировании нового кормоприготовительного оборудования является обеспечение более низкой себестоимости приготовления кормов [1–3]. Для этого необходимо снизить энергоёмкость процессов при сохранении необходимого качества комбикорма. Качественное приготовление кормосмеси наиболее целесообразно выполнять смесителем периодического (порционного) действия [4, 5]. Среди них широкое распространение получили смесители с лопастными и шнековыми рабочими органами [6]. Это обусловлено тем, что состав комбикорма характерен наличием сухого измельчённого зерна (более 90%), не изменяющего своих свойств в процессе смешивания с добавками. То есть реологические свойства смеси можно считать неизменными в течение всего опыта [7].

Одной из перспективных моделей циркуляционных смесителей является модель с наклонным бункером, внутри которого установлены один или два шнековых рабочих органа. При этом снижение энергоемкости процесса достигается вследствие того, что принудительная подача смешиваемого материала на верхнем горизонтальном уровне заменяется гравитационным его осыпанием из верхней части бункера [8]. В отличии от горизонтальных смесителей, фактическое отсутствие «придавливающих» слоёв корма в верхней части шнека значительно улучшает диффузионное перемешивания продукта [9]. Интенсивное движение материала и выровненный гранулометрический состав сырья, при применении современных дробилок [10, 11], позволяет минимизировать возникающие при осыпании эффекты сегрегации [12].

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводили на наклонном одновальном шнековом смесителе кормов периодического действия АКМ-3, разработанном в АНЦ «Донской». Смеситель кормов АКМ-3 (рис. 1) вместимостью 2,5 м^3 предназначен для получения однородной смеси из сухих измельченных компонентов (зерновое, мучнистое, белково-минеральное сырье) при порционном (периодическом) режиме работы. Он состоит из рамы, корпуса со смесительной камерой, в которой размещен вал со спиральной ленточной противоточной навивкой (шнек), и лопастями в верхней части бункера. Предусмотрена возможность установки корпуса на тензометрические датчики.



Рис. 1. Общий вид наклонного одношнекового порционного смесителя

В таком смесителе при вращении вала перемещение групп частиц материала из одного места в другое (конвективное смешивание) с наклонным бункером осуществляется в процессе транспортирования его шнеком в верхнюю часть наклонного бункера и гравитационного осыпания материала в нижнюю часть бункера. Поэтому основным преимуществом наклонного смесителя, по сравнению с вертикальными и горизонтальными, является отсутствие мёртвых зон между рабочими органами и стенками смесительной камеры [13].

В качестве критериев, характеризующих эффективность смешивания, были приняты неравномерность распределения контрольного ингредиента в смеси и удельная энергоемкость процесса. В качестве основного ингредиента (наполнителя) смеси в экспериментах использовали измельченную пшеницу влажностью не более 15% с насыпной плотностью 750 кг/м^3. В результате приготовили двухкомпонентную смесь в составе: измельченная пшеница — 99%, измельченная поваренная соль — 1% (по массе).

В качестве контрольных ингредиентов для определения неравномерности смешивания использовали измельченную поваренную соль. Её распределение определяли, отбирая по 20 проб массой 50 г каждая из различных точек смесительной камеры, после завершения смешивания [14]. Отбор конкретной пробы производился по ГОСТ 13 496.0–80. Содержание сухого контрольного компонента (поваренной соли) в пробах определяли ионометрическим методом по ГОСТ 13 496.1–98. В качестве показателя неравномерности смешивания использовали коэффициент вариации фактического распределения контрольного компонента в пробах v, % (y_1).

Удельную энергоемкость процесса смешивания $N_{уд}(y_2)$ определяли как общую энергоемкость, отнесенную к массе кормосмеси, измеряемую посредством трехфазного электрического счетчика [15].

Частоту вращения вала смесителя изменяли частотным преобразователем DELTAVFd-075E путем изменения частоты тока асинхронного электродвигателя.

При проведении эксперимента был реализован трёхуровневый план второго порядка. Опыты при реализации плана проводили в трехкратной повторности [16,17]. План проведения экспериментов предусматривал варьирование четырьмя независимыми факторами, влияющими на процесс смешивания (таблица 1).

Установлено, что значимость показателя неравномерности смешивания значительно выше, чем у последнего фактора, который должен рассматриваться как вспомогательный.

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Кодированное обозначение	Диапазон варьирования	Интервал варьирования
Частота вращения вала, мин$^{-1}$	x_1	20–40	10
Коэффициент заполнения камеры смесителя	x_2	0,4–0,6	0,1
Продолжительность (время) смешивания, мин	x_3	2–6	2
Угол наклона смесительной камеры, град	x_4	15–35	10

Результаты исследования. После обработки результатов экспериментов были получены уравнения регрессии в закодированном виде и определены соответствующие коэффициенты корреляции:

$y_1 = 4,06 - 0,96x_1 + 0,29x_2 + 0,16x_3 - 0,88x_4 - 0,14x_1x_2 - 0,19x_1x_3 + 0,54x_1x_4 + 0,28x_2x_3 - 0,39x_2x_4 - 0,20x_3x_4 + 0,56x^2_1 + 0,27x^2_2 + 0,34x^2_3 + 0,64x^2_3$,

коэффициент корреляции $R_1 = 0,9607$;

$y_2 = 2,26 + 0,99x_1 + 0,42x_2 - 0,07x_3 - 0,28x_4 + 0,22x_1x_2 - 0,15x_1x_3 + 0,35x_1x_4 + 0,13x_2x_3 + 0,47x_2x_4 - 0,08x_3x_4 + 0,73x^2_1 + +0,37x^2_2 + 0,14x^2_3 + 0,84x^2_3$,

коэффициент корреляции $R_2 = 0,9781$.

Адекватность модели оценивали по критерию Фишера. Табличное значение критерия Фишера с уровнем значимости Δ=0,05 равно F=2,8. Значение критерия Фишера в моделях: неоднородность смешивания

F=2,51; энергоемкость процесса смешивания *F*=2,65. Сравнение расчетных значений с табличными показало, что расчетные их значения меньше табличных. Следовательно, регрессионные модели адекватно описывают исследуемый процесс. Экспериментальные значения критерия Кохрена не превышают табличных. Дисперсии являются однородными.

Переходя от кодированных значений факторов (X_1, X_2, X_3, X_4,) к натуральным (*n*, *k*, *t*,φ), получили зависимости показателей неравномерности смешивания (δ, %) и энергоемкости процесса смешивания (*N*, кВт·ч) от основных факторов в следующем виде:

– неравномербность смешивания:

$$\delta = 3{,}76 + 11n - 0{,}15k - 1{,}02t - 2{,}35\varphi + 16nk - 21nt - 59n\varphi - 0{,}06kt + 0{,}98k\varphi + 2{,}35t\varphi + 2{,}15n^2 + 4{,}33k^2 + 3{,}65t^2 + 0{,}75I^2;$$

– энергоемкость процесса смешивания:

$$N = 2{,}19 + 23n + 4{,}13k + 6{,}25\varphi - 13nk - 3{,}4n\varphi - 5{,}23k\varphi + 0{,}99n^2 + 0{,}48k^2 + 0{,}39\varphi^2.$$

В результате обработки экспериментальных данных построены графические зависимости критериев оптимизации от уровня варьирования факторов, представляющие собой совмещенные двумерные сечения поверхностей отклика второго порядка.

На рис. 3 и 4 показаны некоторые двумерные поверхности отклика влияния факторов на процесс смешивания. В частности, показаны зависимости влияния частоты вращения вала и коэффициента заполнения смесительной камеры на неравномерность смешивания и энергоёмкость процесса.

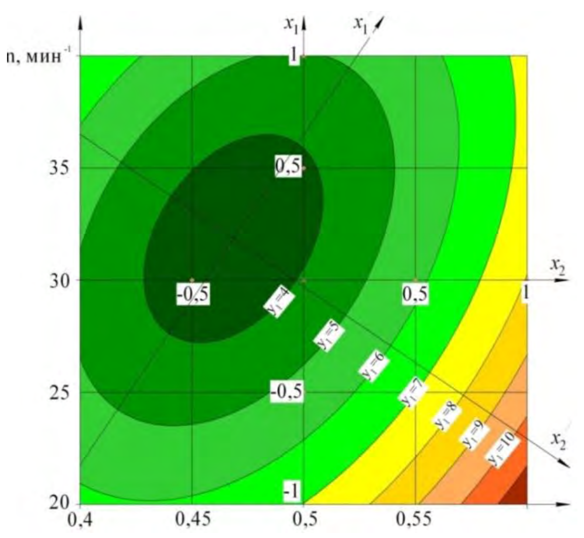


Рис. 3. Влияние частоты вращения вала и коэффициента заполнения смесительной камеры на неравномерность смешивания

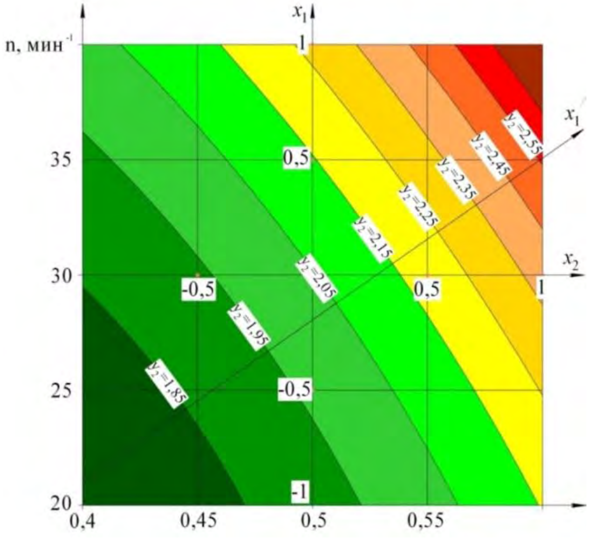


Рис. 4. Влияние частоты вращения вала и коэффициента заполнения смесительной камеры на энергоёмкость процесса смешивания

В результате проведенных исследований определены рациональные значения параметров и режимов работы наклонного одновального порционного смесителя вместимостью 2,5 м^3 со шнековым рабочим органом при приготовлении кормосмесей, отвечающие зоотехническим требованиям по неравномерности смешивания при условии минимальной энергоемкости процесса. Рациональными значениями для достижения неравномерности смешивания не более 5% являются: частота вращения вала n= 27,5–36,5 мин$^{-1}$; коэффициент заполнения смесительной камеры k = 0,43–0,51; продолжительность смешивания t= 3–4,2 мин; угол наклона смесительной камеры φ = 22–25°. При этом энергоёмкость процесса составила от 2,08 до 2,16 кВт·ч/т.

Помимо этого, в результате экспериментальных исследований установлена наименьшая неоднородность смешивания 3,2 % при следующих режимах и параметрах смесителя: частота вращения вала n=35 мин$^{-1}$; коэффициент заполнения смесительной камеры k=0,5; продолжительность смешивания t=3 мин; угол наклона смесительной камеры φ=30°. При этом энергоёмкость процесса составляла 2,2 кВт·ч/т. Наименьшая энергоёмкость 2,1 кВт·ч/т при неоднородности смешивания 5% достигается при следующих значениях параметров и режимов работы смесителя: частота вращения вала n=30 мин$^{-1}$; коэффициент заполнения смесительной камеры k=0,55; продолжительность смешивания t= 3 мин.; угол наклона смесительной камеры φ=25°.

Обсуждение и заключения. Зависимости, полученные в результате экспериментальных исследований, позволили установить области рациональных конструктивных параметров и режимов наклонного одновального шнекового смесителя периодического действия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технических средств для производства комбикормов, а также для модернизации существующих комбикормовых производств с целью увеличения их энергоэффективности.

Библиографический список

1. Афанасьев, В. А. Энерго- и ресурсосберегающие технологии комбикормов / В. А. Афанасьев. — Воронеж : ВГУИТ, 2017. — 473 с.

2. Хлыстунов, В. Ф. Модель процесса смешивания кормов в порционном наклонном одношнековом смесителе / В. Ф. Хлыстунов [и др.] // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий : сб. науч. докл. междунар. науч.-техн. конф. — Москва, 2014 — с.41–45.

3. Фролов, В. Ю. К анализу технологических и технических средств процесса приготовления высококачественных кормов / В. Ю. Фролов, Д. П. Сысоев, А. С. Сергунцов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2014. — № 101. — С. 2108–2120.

4. Пахомов, В. И. Оборудование для приготовления полнорационных комбикормов в условиях хозяйств / В. И. Пахомов, А. В. Смоленский, А. С. Алферов // Вестник Донского. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 12, № 7 (68). — С. 108–114.

5. Сабиев, У. К. Обоснование параметров и анализ рабочих органов смесителя кормов / У. К. Сабиев, А. Н. Яцунов, А. В. Черняков // Сельский механизатор. — 2016. — № 6. — С. 26–27.

6. Хлыстунов, В. Ф. Моделирование процесса смешивания кормов в шнековом смесителе с наклонным бункером / В. Ф. Хлыстунов [и др] // Вестник РАСХН. — 2007. — №4. — с.13–15.

7. Barnes, H.A., Hutton, J.F. and Walters, K. An Introduction to Rheology. Rheology Series, Vol 3. Elsevier. - 1989. - 199 pp.

8. Ottino J.M., The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport, Cambridge University Press. - 1989. - 364 pp.

9. Cullen P. J. (ed.). Food mixing: Principles and applications. – John Wiley & Sons, - 2009. DOI : https://doi.org/10.1002/9781444312928

10. Гуриненко, Л. А. Дисковый измельчитель кормового зерна/ Л. А. Гуриненко [и др.] // Техника и оборудование для села. — 2014. — № 10. — С. 9–11.

11. Пахомов, В. И. Вертикальные дробилки для производства комбикормов / В. И. Пахомов [и др.] // Сельский механизатор. — 2015. — №11. — С. 27.

12. Rielly C. D. et al. Mixing processes for agricultural and food materials: Part 4, assessment and monitoring of mixing systems //Journal of agricultural engineering research. – 1994. – Т. 59. – №. 1. – С. 1-18.DOI : https://doi.org/10.1006/jaer.1994.1060

13. Paul, E.L. Handbook of Industrial Mixing / E.L Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta, // Science and Practice. John Wiley & Sons. – 2004. – P.1440pp.

14. ГОСТ 70.19.2-83 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и оборудование для приготовления кормов. Программа и методы испытаний. — Москва : Стандартинформ, 1991. — 94 с.

15. L. Rudolph, Power consumption andblend time of co-axial tank mixing systems in non-Newtonianfluids / V. Atiemo-Obeng, M. Schaefer, M. Kraume. 13thEuropean Conference on Mixing, London, British – 2009, - pp. 1–8.

16. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников [и др.]. — Ленинград : Колос, 1980. — 168 с.

17. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования эксперимента / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. — Москва : ДеЛиПринт, 2005. — 296 с.

Поступила в редакцию 04.06.2018
Сдана в редакцию 06.06.2018
Запланирована в номер 19.09.2018

Received 04.06.2018
Submitted 06.06.2018
Scheduled in the issue 19.09.2018

Об авторах

Хлыстунов Виктор Фёдорович,
профессор кафедры «Технологии и оборудование переработки продукции АПК» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/000-0002-2743-0698
vniptim@gmail.ru

Брагинец Сергей Валерьевич,
ведущий научный сотрудник Аграрного научного центра «Донской» (РФ,347740 г. Зерноград, Ростовская область, ул. Ленина, 14), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7137-5692
sbraginets@mail.ru

Алфёров Александр Сергеевич,
научный сотрудник Аграрного научного центра «Донской» (РФ, 347740 г. Зерноград, Ростовская область, ул. Ленина, 14), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5210-781X
alfa-8303@yandex.ru

Чернуцкий Михаил Викторович,
ведущий инженер Аграрного научного центра «Донской» (РФ, 347740, г. Зерноград, Ростовская область, ул. Ленина, 14),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9936-1978
mux346@yandex.ru

Authors:

Khlystunov, Victor F.,
professor of the Technologies and Processing Equipment for Agro-Industrial Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/000-0002-2743-0698
vniptim@gmail.ru

Braginets, Sergey V.,
Senior Research Scholar, Agricultural Research Centre “Donskoy” (14, Lenin St., Zernograd, Rostov region, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7137-5692
sbraginets@mail.ru

Alferov, Alexander S.,
Research Scholar, Agricultural Research Centre “Donskoy” (14, Lenin St., Zernograd, Rostov region, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5210-781X
alfa-8303@yandex.ru

Chernutskiy, Mikhail V.,
senior engineer, Agricultural Research Centre “Donskoy” (14, Lenin St., Zernograd, Rostov region, RF),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9936-1978
mux346@yandex.ru